История трехфазного индукционного (асинхронного) электродвигателя.

В конце 19 века трехфазный асинхронный двигатель, далее АД, стал центральным элементом повышения роста производительности труда во время второй промышленной революции в Европе и США. В настоящее время это основная нагрузка электрических систем достигающая примерно 70% потребление энергии в промышленности во всем мире. В 20 веке электродвигатели подверглись интенсивным технологическим изменениям которые позволили значительно повысить производительность.

В этой публикации приведен обзор изменений рабочих характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, механической мощностью 3,7 *квт*, 37 *квт* и 150 *квт* и диапазонами скоростей соответствующим от двух до восьми полюсов, подключенных к низкому напряжению частотой 60 *гц* и в сравнении данных электродвигателей между 1945 и 2020 годами. В этой публикации также использованы данные собранные при испытаниях проводившихся в лаборатории электрических машин Института энергетики и окружающей среды Университета Сан-Паулу. Лаборатория имеет свою историю испытаний электрооборудования с 1911 года.
Изоляционные материалы для электрических проводников прошли через несколько поколений, хлопок, шелк, и в настоящее время лак. Доработки корпуса по охлаждению, подшипников, качества используемых материалов в электродвигателе и изменения в конструкции позволили добиться значительного прироста производительности.
Первый коммерческий двухполюсный АД с мощностью на валу 4,4 *квт* поступил в продажу в 1891 г. с соотношением вес/мощность 86 килограмм веса электродвигателя на 1 *квт* мощности на валу, и до 2000-х годов это значение постепенно снижалось, достигнув в итоге 4,8 *кг*/*квт*. В период с 2000 по 2020 год это соотношение демонстрировало обратное движение по причине стремления к росту *кпд*. Было использовано больше активных материалов в результате соотношение веса и мощности достигло 8,6 *кг*/*квт*. Принятые стандарты минимальной энергоэффективности АД сыграли важную роль в росте производительности за последние три десятилетия.

Производство механической силы было одним из основных достижений человека в процессе эволюции, который привел homo sapiens от животного, по своей природе, к строительству мегаполисов и технологическому прогрессу. Процесс создания механической силы прошел несколько стадий. Одомашнивание животных представляло собой важный шаг в повышении производительности труда необходимой для изменения образа жизни от охотника и собирателя к фермеру – пастуху. При использовании одомашненных животных homo sapiens мог выполнять деятельность без необходимости непосредственного использования мышечной силы.
Производство механической силы было главной причиной первых двух великих промышленных революций. Первая промышленная революция началась в Англии примерно в 1750 – 1760 годах и продолжилась между 1820 – 1840 годами и была отмечена развитием применения паровой машины в промышленных производственных процессах. Вторая промышленная революция заменила паровые двигатели и нефтяные двигатели электрическими двигателями.
В конце 19 века электродвигатели оказались более экономичными по сравнению с другими источниками привода механизмов. Они требовали меньше обслуживания, занимали меньше места, работали с более равномерной скоростью и обеспечивали более чистую окружающую среду. Всего за одно поколение, после появления электродвигателя в 1880-х годах, электродвигательный привод заменил пар в качестве предпочтительного средства обеспечения движущей силы.

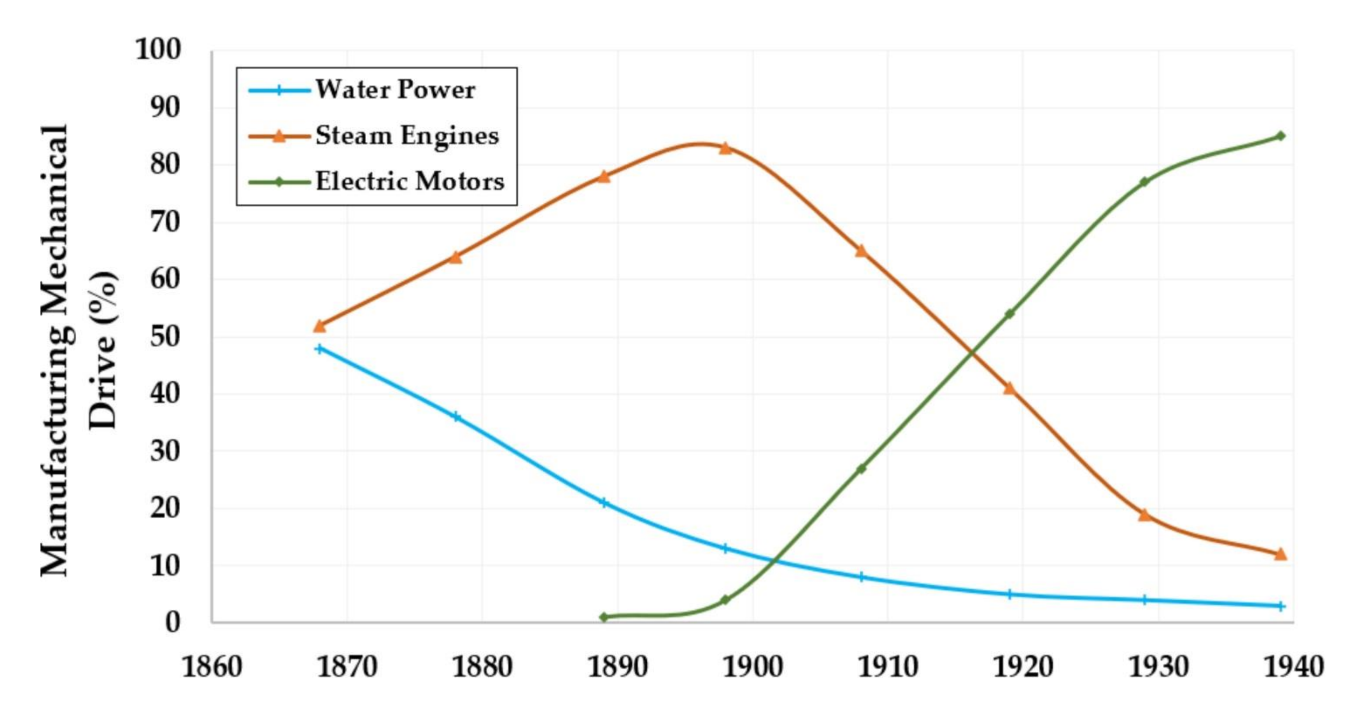


Рис. 1. Изменение по годам соотношение источников механического привода в промышленности в процентах, с использованием гидравлической энергии, паровых двигателей и электродвигателей.

Благодаря крупным электродвигателям и электрификации промышленные предприятия приобрели гибкость. Больше не было необходимости находиться рядом с рекой чтобы использовать механическую энергию воды или угольной шахтой для непосредственного использования угля в паровой машине. Механическая сила, создаваемая водой (рис. 2 *а*) или паровыми двигателями (рис. 2 *б*), как правило, поступала от одной центральной оси, и далее при разделении распространялась по всей длине заводского здания с большими потерями в шестернях, с шумом и вибрацией по всему промышленному предприятию. В ряде случаев двигатели обслуживали различные производственные здания. Соединения образованные ремнями и шестернями могли приводить в действие молоты, прессы, ткацкие станки и другие машины передавая механическую энергию по горизонтали через стены и по вертикали через этажные перекрытия. Из-за больших расстояний и неизбежного трения в этих узлах терялось от 60 до 80% передаваемой энергии. Все подобное хозяйство требовало непрерывной смазки тысячами капель масла, при этом рабочие имели прямой доступ к вращающимся частям подвергаясь высокой вероятности несчастных случаев на производстве.

Электродвигатели оказались более эффективными, уменьшилась зависимость от сложных механических систем, множества шкивов и ремней для распределения механического привода от центрального вала по всей фабрике. Электрический привод стал располагаться близко к нагрузке, а энергия передавалась по небольшим электрическим проводникам (рис. 2 *в*).

Стало возможно надежно применять двигатели электропривода раздельно на механическую нагрузку, что позволило наладить производственный процесс. Благодаря разделению механических приводов была достигнута гибкость в обслуживании, независимый локальный ремонт, во время поломки не было необходимости останавливать всю фабричную установку. Эта свобода произвела революцию в промышленном дизайне и компоновке, предоставила возможность оптимизации управления технологическим процессом и улучшения условий работы, что привело к значительному повышению производительности.

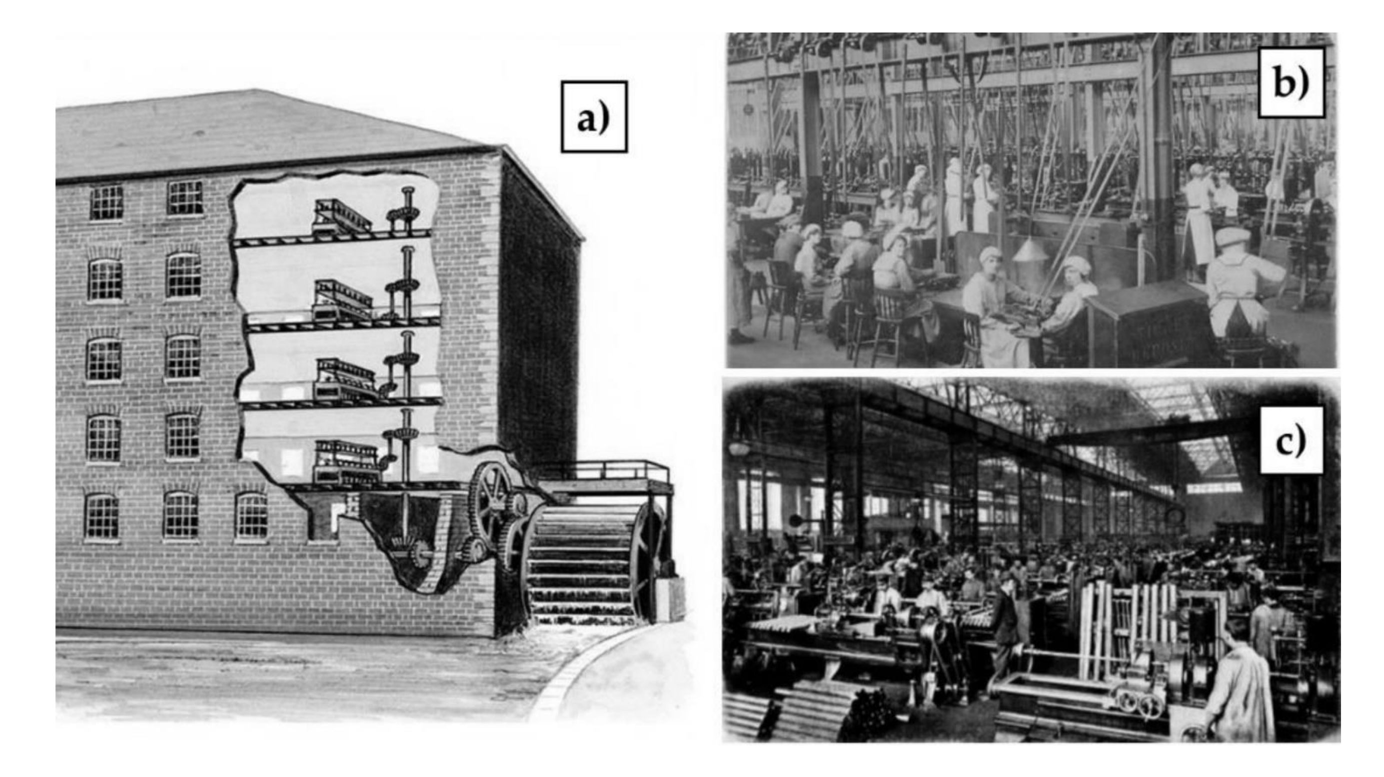


Рис. 2. Промышленная организация механического привода на основе
(а) гидравлической энергии (б), паровой машины и (с) электродвигателя.

В настоящее время электродвигатели являются движущей силой современного индустриального общества. Электродвигатели приводят в действие бытовые холодильники, приводят в действие вентиляцию, обеспечивают производство сжатого воздуха и перемещение грузов по конвейерной ленте, поддерживают водоснабжения в городах и многое другое. Было разработано несколько технологий электродвигателей. Однако только три стали основными в промышленных стационарных электроприводах:

1. Двигатели постоянного тока, которые были разработаны первыми. Их применение ограничено ситуациями в которых регулирование скорости имеет важное значение, поскольку, контролируя напряжения подаваемые на обмотки ротора (якоря) и обмотки статора (индуктора), можно точно настроить скорость в широком диапазоне. Однако они дороги, имеют искрение вызванное коммутируемыми токами и не могут быть подключены напрямую к электрической сеть без преобразователя. Они также имеют бо́льшую потребность в обслуживании по сравнению с другими типами электродвигателей.

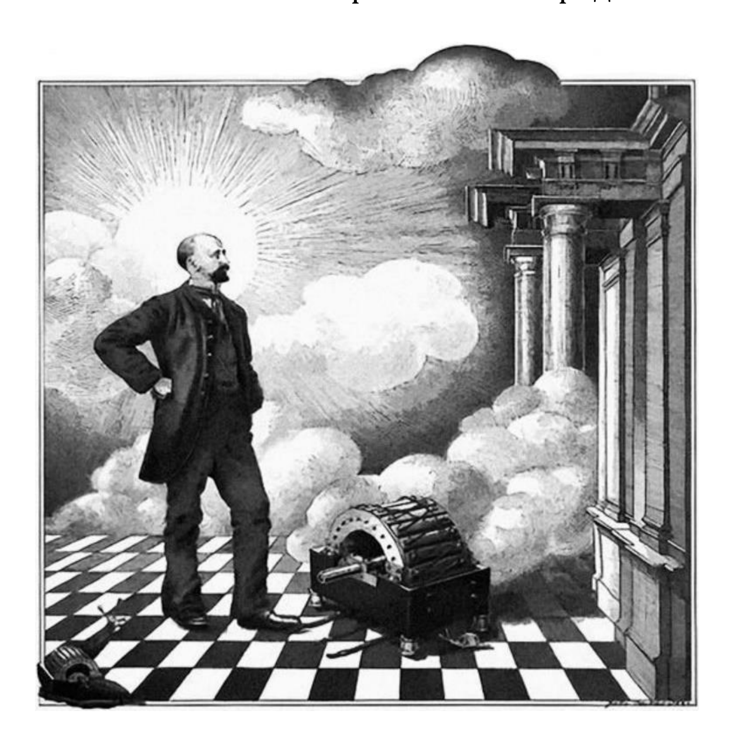
2. Синхронные двигатели переменного тока в основном предназначены для приводов с большой нагрузкой требующих постоянной скорости. Они также дороги и требуют дополнительных пусковых устройств и преобразователей для питания обмотки ротора отдельно от обмотки статора (обмотки полюсов). Синхронные двигатели являются двигателями с высоким *кпд*, так как они имеют низкие потери в роторе.

3. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором с момента их разработки были преобладающим выбором в жилых (однофазные АД), коммерческих и промышленных (трехфазные АД) областях применения. Асинхронные двигатели составляют около 87% от общего числа электродвигателей переменного тока используемых в промышленности. Несколько факторов делают АД подходящими для самого широкого применения.

Некоторые преимущества АД.

Низкая стоимость и стоимость обслуживания по сравнению с другими типами электродвигателей. Простая конструкция делают АД изготовление простым по сравнению с конкурирующими технологиями. Простая замена благодаря высокой степени стандартизации корпусов и соединений. Длительный срок службы. Высокая степень регулирования скорости с помощью частотно-регулируемого привода, что также позволяет экономить электроэнергию. Небольшие габариты – можно использовать в стесненных местах. Не образует искрения, как двигатель постоянного тока, что упрощает применение во взрывоопасных зонах. Высокий пусковой крутящий момент по сравнению с другими конкурирующими технологиями. Более тихий по сравнению с другими типами электродвигателей. Электрический контакт между ротором и статором отсутствует, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность. Питание непосредственно переменным током без использования преобразователей. Простое обнаружение неисправностей различной природы (электрических, механических, тепловых).
Для изготовления АД используются не сложные технологии, из не дефицитных и не дорогих материалов. Не зависят от материалов с высокой стоимостью в цепочке поставок, таких как например редкоземельные магниты, присутствующие в синхронных электродвигателях с постоянными магнитами (PMSM).
К концу 19 века все технологические и теоретические основы разработки электродвигателей были уже разработаны. На рынке были представлены двигатели постоянного тока, а двигатели переменного тока находились на стадии полной разработки, исследования велись в Европе и Соединенных Штатах. Первую заявку на патент на электродвигатель с асинхронной технологией в 1888 г. был подан инженером Николой Теслой и выдан в 1889 г. в Нью-Йорке. И тогда же, в 1888 г. Николой Теслой, было опубликовано описание поясняющее принцип работы нового электрического асинхронного двигателя под названием "Новая система двигателей и трансформаторов переменного тока". Асинхронный двигатель стал известен как индукционный двигатель, исходя из принципа его работы. Однако предложение Теслы было похоже на нынешние однофазные двигатели со вспомогательной обмоткой и на двигатели с фазным ротором. Параллельно с экспериментами Николы Теслы в Италии проводил эксперименты Галилео Феррарис. В 1885 году Феррарис предложил идею о том, что два противофазных тока можно использовать для создания двух магнитных полей, которые можно комбинировать для создания вращающегося поля без необходимости механически переключать токи в обмотке.
Ближайший к современному типу трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором был разработан в немецкой компанией AEG (Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft), возглавляемой русским инженером Михаилом Доливо-Добровольским в период с 1888 по 1890 год.
Электродвигатель разработанный командой Добровольского имел очень хорошие характеристики, высокий пусковой крутящий момент, более простые конструктивные особенности, надежность конструкции и низкую потребность в обслуживании. Однако у него также было неудобство связанное с необходимостью питания от трехфазной системы переменного тока, которая еще не была распространена. В то время доступными электрическими системами были однофазные и двухфазные системы. Однофазный и двухфазный ток питания не обеспечивал эффективного запуска двигателя предложенного Тесла (практически отсутствует пусковой момент), в дополнение к некоторой степени вибрации во время работы.
Трехфазный АД имеет бóльший пусковой момент и не требует вспомогательных обмоток и устройств, таких как конденсатор и центробежный выключатель, и более низкий рабочий ток по сравнению с однофазным двигателем.

Однако системы производства, передачи и распределения электроэнергии трехфазного тока были быстро реализованы для использования привлекательных АД.
Добровольский и компания AEG прославились великим изобретением. Художница Ирен Аренс создала картину на рис. 3, которая была выставлена в Берлине. Инженер в Зале Славы со своим асинхронным электродвигателем у его ног.



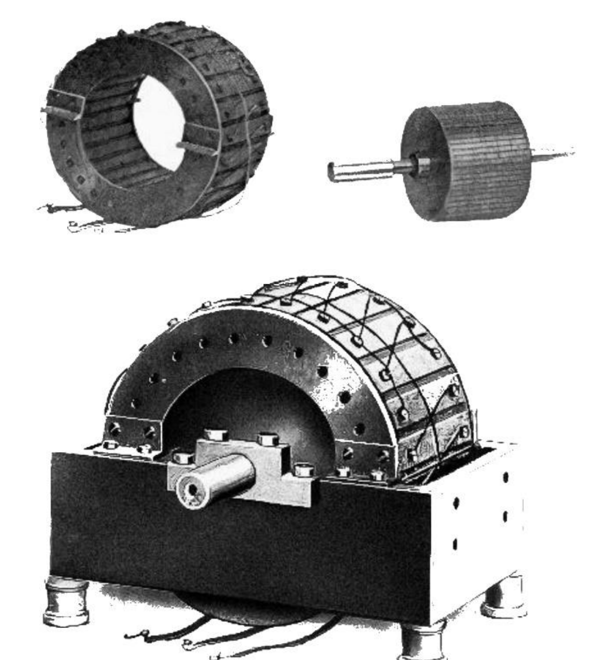


Рис. 3. Михаил Доливо-Добровольский в Зале Славы со своим трехфазным асинхронным электродвигателем.

В 1891 году в AEG Добровольский руководил первым серийным производством АД с мощностью на валу от 0,4 до 7,5 *квт*. Первые собранные АД имели *кпд* примерно 80% для производимого ряда мощностей и очень большой вес по сегодняшним меркам. Первые коммерческие двухполюсные АД с мощностью на валу 4,4 *квт* поступили в продажу в 1891 г. Эти АД имели отношение массы к мощности 86 *кг*. на 1 *квт*, как показано на рис. 4. Компания AEG опубликовала изображение, представленное на рис. 4, на котором показано соотношение веса и мощности от первых АД изготовленных компанией в 1891 г., до АД произведенных в 1984 г. Оптимизация материалов электрического, магнитного и механического назначения в сочетании с технологическими новшествами позволили достичь соотношения 6,8 *кг/квт* в 1984 г. что составляет всего 8% от общей массы двухполюсного двигателя с мощностью на валу 4,4 *квт*, произведенного в 1891 г. Концепция АД не изменилась с начала его производства, однако объем значительно изменился (рис. 4). Изменение отношения веса к мощности привело к улучшению эксплуатационных характеристик, еще большей надежности, универсальности и увеличению срока службы.
Определяются следующие усовершенствования АД.
- переход с открытого корпуса на закрытый.
- замена подшипников скольжения на подшипники качения, в 1945 г. 35–40% АД использовали подшипники скольжения.
- замена изоляции проводов в обмотках статора с хлопчатобумажной на лак.
- изменение конструкции короткозамкнутого ротора с медными стержнями на конструкцию с литой алюминиевой корзиной обмотки ротора.
Принятие отраслевых стандартов сыграло значительную роль в развитии АД. Примером может служить классификация термостойкости изоляционных материалов, которая впервые появилась в 1898 году.

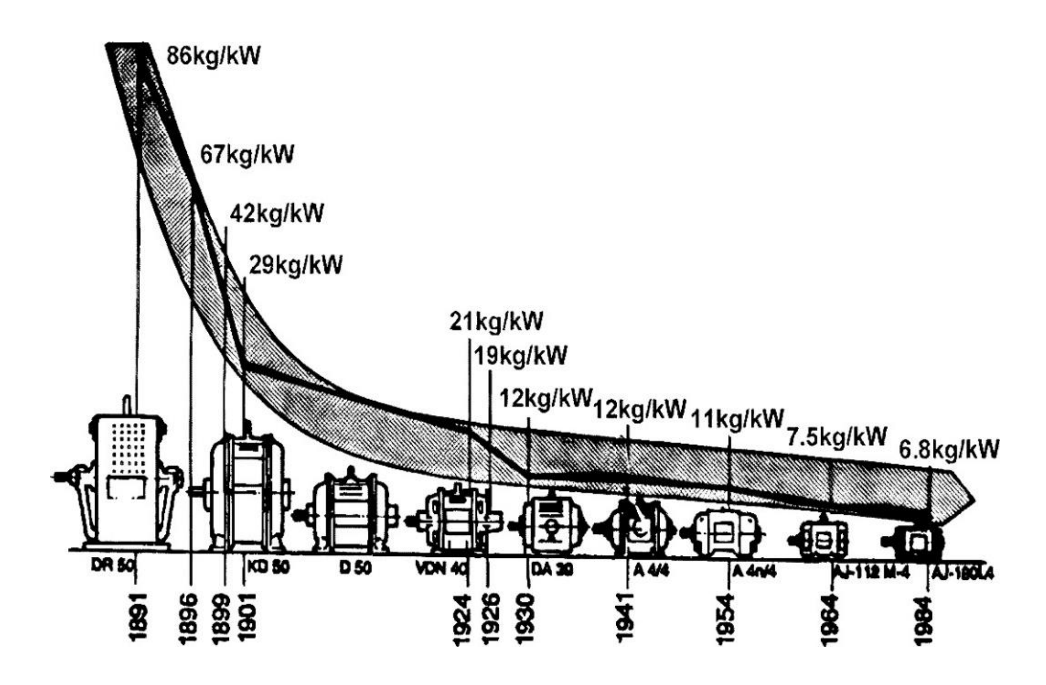


Рис. 4. Изменение соотношения веса и мощности АД AEG между 1891 и 1984 годами.

В 1911 году стандарты AIEE (ныне IEEE — Институт инженеров по электротехнике и электронике) установили предельные температуры для АД. Издание стандартов AIEE 1915 года включало определения классов изоляции A, B и C и материалов, отнесенных к этим классам. В 1929 году на рынок были выпущены первые АД, построенные по стандартам NEMA, впервые установившие стандартные размеры и рабочие характеристики для конкретных номиналов. Пользователям была предоставлена возможность напрямую заменять АД на основе концепции стандартных электродвигателей для быстрой замены в случае их поломки. На рисунке 5 можно наблюдать технологические инновации, которые сыграли решающую роль в уменьшении веса и объема АД.

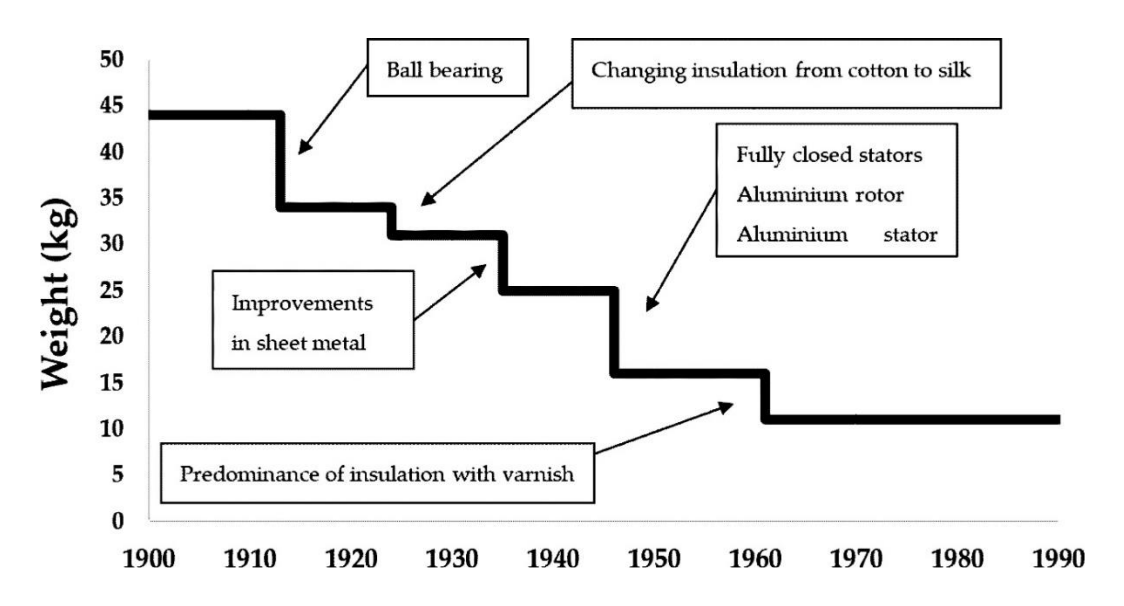


Рис. 5. Хронология снижения массы АД мощностью 0,75 *квт* с 1900 г. по 1990 г.

Ball bearing – начало использования подшипников качения, changing insulation from cotton to silk – использование шелка вместо хлопка в качестве изоляции, improvement in sheet metal – улучшение листового металла, fully closed stators, aluminium rotor, aluminium stator – появление полностью закрытого корпуса двигателя, использование ротора с заливкой стержней алюминием, алюминиевый корпус, predominance of insulation with varnish – преобладание изоляции лаком.

В начале 20-го века первым заметным технологическим улучшением стала разработка шарикоподшипников, заменивших традиционные подшипники скольжения, которые были громоздкими, тяжелыми и требовали постоянной смазки маслом. С новыми подшипниками и уменьшением потерь на трение, вес и объем АД значительно уменьшился. В период с 1913 по 1940 год улучшилось качество материалов, что позволило уменьшить объем меди и железа используемых в АД и уменьшить потери. В 1940-х годах роторы, которые ранее изготавливались только из железа, начали выпускать с использованием заливки алюминием, что привело к еще большему уменьшению массы, как показано на рис. 5. Кроме того, в 1940-х годах, с последовательным развитием металлургии, корпуса АД можно было строить все более закрытыми и поддерживать охлаждение обмоток расположенных в статоре.

В начале 1960-х годов ряд достижений в области изоляции сыграли важную роль в сокращении объема АД. Между 1960 и 1970 годами АД прошли через пять поколений материалов используемых для создания изоляции электрических проводников. В первых АД изоляция проводников состояла из бумаги, а затем из хлопка, тогда как в наши дни преобладает изоляция лаком. На рис. 6 белым цветом показана площадь, необходимая для размещения электрических проводников одинакового сечения в пазе магнитного пакета статора при различных технологиях изоляции. Первым значительным нововведением в изоляции была замена двойных слоев хлопка проводников двумя слоями шелка, что позволило уменьшить площадь паза статора примерно на 59%. Вторым важным нововведением стало применение лака в сочетании с шелком, что дало еще уменьшение площади более чем на 2%, как показано на рисунке 6. Впоследствии улучшение качества шелка, а затем и лака позволило достичь площади, эквивалентной всего 22% в сравнении пространства необходимого для того же электрического проводника изолированного хлопком.

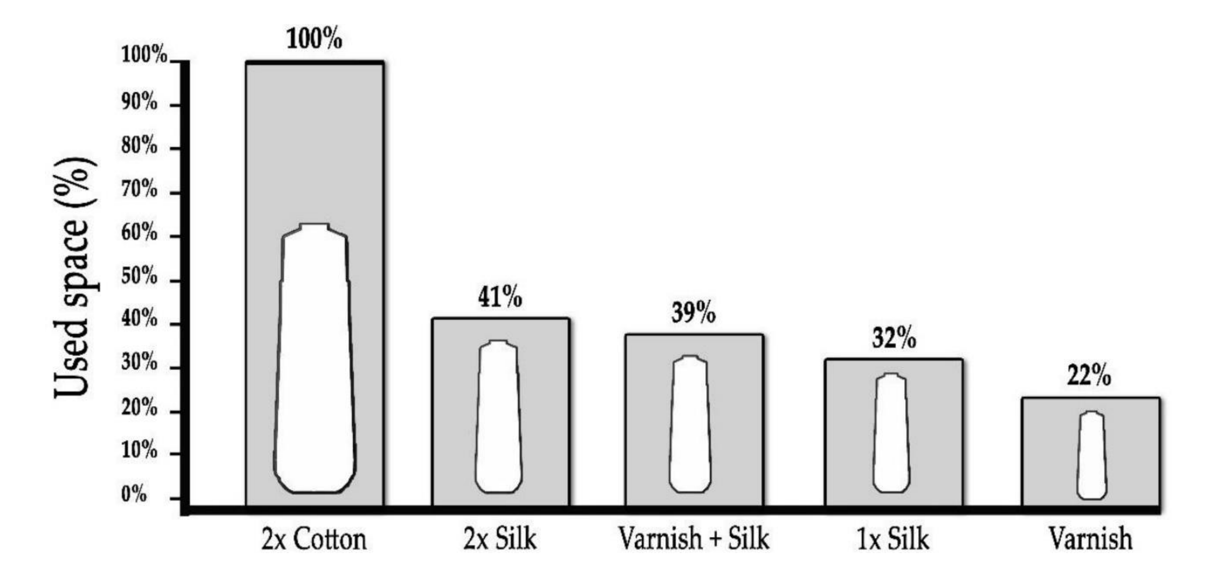


Рис. 6. Уменьшение пространства паза при различных технологиях изоляции проводника для одной и той же выходной мощности АД.

Последовательные технологические усовершенствования привели к значительному объемному уменьшению АД в период с 1903 по 1974 год показанное на рисунке 7*a*. На рис. 7*b* показаны изменения внешнего вида и корпуса и габарита АД разной мощности от открытой конструкции 1904 г. до конструкции 1970-х годов аналогичных современным АД с защитой от капель и полностью вентиляторным охлаждением.

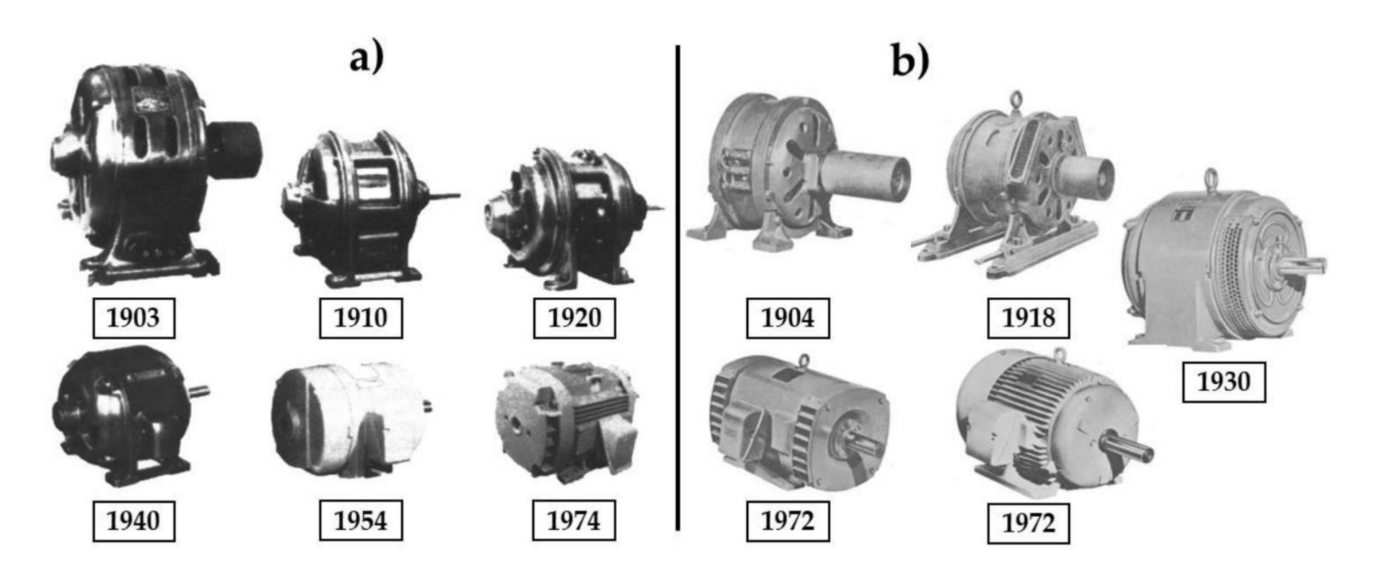


Рис. 7. Изменения размеров и корпуса 4-полюсных АД мощностью 11 *квт* в период с 1903 по 1974 год. (*a*). Изменение внешнего вида и габаритов АД разной мощности от открытой конструкции 1904 года до закрытой 1970-х годов. (*b*).

На рис. 7*a* представлены АД, предназначенные для работы при напряжении 220 *в* и 11 *квт* производства General Electric (GE). На рисунке 7*a* можно проследить изменения в корпусе стандарта NEMA между 1920 и 1974 годами, видны два важных изменения – удлинение ротора и закрытый корпус появившийся в 1954 году и ставший возможным благодаря усовершенствованию изоляции позволяющей передавать тепло от обмоток наружу. На рис. 7*b* показан небольшой АД (1904 г.) построенный без вентилятора и считающийся "самовентилируемым" благодаря полуоткрытому корпусу. Уже в 1918 году в АД для охлаждения использовался вентилятор прикрепленный к валу. В 1930 году АД мощностью 15 *квт* уже имел более эффективный вентилятор и более закрытую конструкцию. В 1972 году двигатели уже были полностью защищенными от капель воды. На рис. 7*b* показаны АД мощностью 18,5 *квт* и 45 *квт*.

В результате улучшенной изоляции, более тонкой проводников и пазовой изоляции, температура обмоточных проводов и стенок паза стала более однородной, так как они были ближе вместе с более тонким изоляционным слоем. Температура электродвигателя уменьшилась и по этой причине удалось значительно увеличить мощность для того размера двигателя. Паз статора был значительно уменьшен при той же мощности, а промежуток между пазами увеличен. Также был улучшен ферромагнитный материал, увеличен магнитный поток и как следствие уменьшено количество витков на катушку статора при том же электрическом напряжении.

Чтобы избежать горячих точек в центрах длинных сердечников в статоре появились радиальные каналы, а на роторе дополнительные лопатки работающие как вентиляторы, создающие охлаждающий поток воздуха. Таким образом, рейтинг NEMA, присвоенный корпусу с высотой оси 25,4 *см*. и длиной и 31,1 *см*. был увеличен в отношении механической мощности с 5,5 *квт* в 1897 г. до 75 *квт* в 1974 г., как показано в таблице. Сокращение объема АД позволило также снизить их стоимость одновременно ускоряя электрификацию промышленных предприятий. Например, в 1890 г. АД мощностью 3,7 *квт* весил около 450 *кг* и стоил около 900 долл. США, а в 1957 г. АД той же мощности весил около 50 *кг* и стоил 110 долларов США. Соотношение между стоимостью и весом практически не изменилось, однако, поскольку вес значительно уменьшился, цена АД значительно снизилась, поскольку стоимость АД в основном зависит от количества и качества используемых материалов.

Увеличение мощности в одном и том же размере статора с 1898 по 1974 год.

год	мощность АД, *квт*	при окружающей температуре
1898 – 1903	5,5	40
1903 – 1905	7,5	40
1905 – 1914	11	40
1914 – 1924	15	40
1924 – 1929	18,5	40
1929 – 1940	22	40
1940 – 1956	30	50
1956 – 1961	37	50
1961 – 1966	45	50
1966 – 1974	75	50

Компания Hitachi произвела три АД 3,7 *квт* в 1910 г., а в 2010 г. общий объем производства составил уже 40 млн. АД. За этот период компания зафиксировала значительные успехи достигнутые АД за более чем 100 лет. Hitachi разделяет достижения в электродвигателях на три периода. Между 1830 и 1890 годами – период изобретений, с 1930 по примерно 1950 год – период научных инициатив, а между 1950-ми годами и сегодняшним днем период промышленных инициатив. Благодаря различным техническим и технологическим разработкам АД Hitachi стали меньше и легче за 100 лет, с 1910 по 2010 г. На рис. 8 представлены основные технологии использованные Hitachi, позволившие уменьшить массу первого АД мощностью 3,7 *квт* (четыре полюса), изготовленного компанией в 1910 г. весом 150 *кг*, примерно на 80% к 2010 г. (30 *кг*).

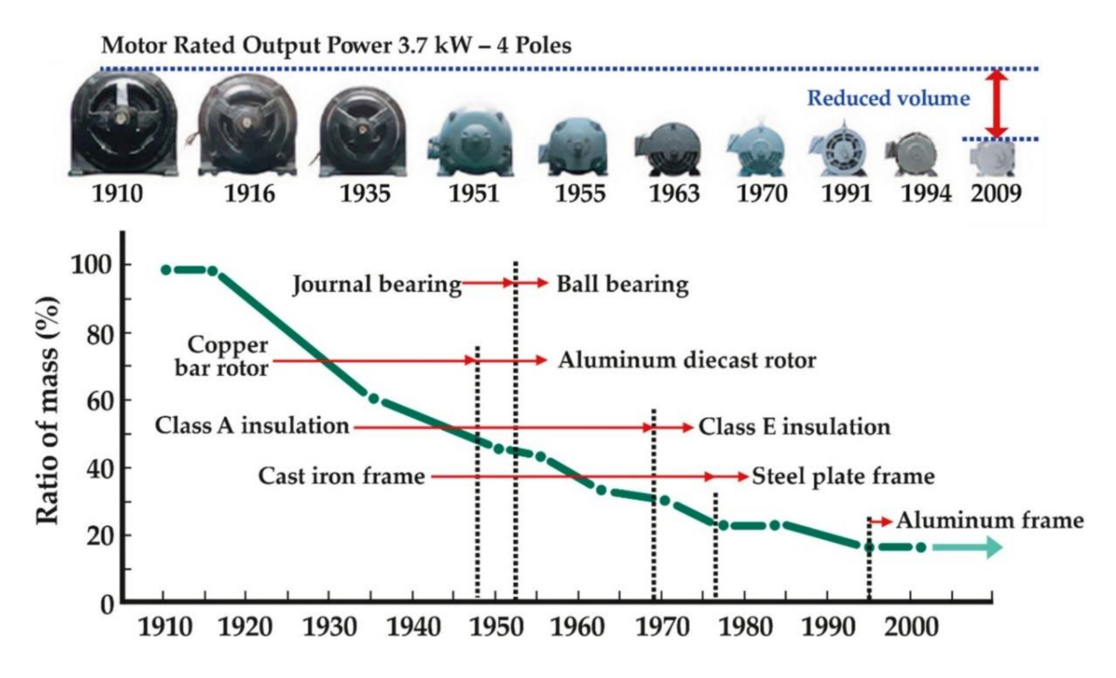


Рис. 8. Изменения веса в процентах АД Hitachi мощностью 3,7 *квт* 4 полюса.

Основными изменениями были начало использование алюминия в роторе в конце 1940 годов, позже, в 1950-х годах усовершенствовались подшипники, перейдя от технологии скольжения к шарикоподшипникам. В конце 1960-х годов были внесены усовершенствования с нанесением на провода новых изоляционных лаков. В середине 1970-х чугунный корпус уступил место более легким деталям из листовой стали (в крупных двигателях). В 1990 годы широкое применения алюминия в конструкции корпусов замкнули цикл крупных технологических инноваций Hitachi за первые 100 лет (1910 – 2010 г.).

Уменьшение объема и потерь ферромагнитных материалов в АД.

Первые электрические устройства с использованием ферромагнитных материалов были разработаны во второй половине 19 века. Знаний о таких материалах и их структуре не было, разработка проектов шла методом проб и ошибок. Чтобы АД процветали, нужно было продвинуться в производстве, передаче и распределении электрической энергии через переменный ток (AC). Чарльз Протеус Штейнмец был нанят General Electric (GE, Томас Алва Эдисон) для улучшения распределительной системы переменного тока. Он разработал синусоидальное представление переменных во времени которое используется до сих пор. Штейнмец углубил свои исследования ферромагнитных материалов, чтобы лучше конкурировать с Westinghouse, которая производила асинхронные двигатели изобретенные Теслой. Первые представления о потерях в ферромагнитных материалах, традиционно называемых потерями в железе, были определены Штейнмецем. Благодаря пониманию как потери ведут себя при изменении напряженности магнитного поля асинхронные двигатели General Electric стали конкурентоспособными благодаря уменьшению объема используемого материала.

Секрет Штейнмеца заключался в том, чтобы использовать более тонкие листы железа в статоре. Потери от вихревых токов зависят от квадрата толщины листа и квадрата напряженности магнитного поля. Открытия Штейнмеца привели к созданию более эффективных прокатных станов, которые производили более тонкие листы металла электротехнической стали.

Понимание ферромагнитных потерь (гистерезис и вихревые токи) имело решающее значение для выбора все более тонких листов для сборки магнитного пакета статора и ротора. Таким образом, удалось использовать большую магнитную индукцию приближающуюся к пределу магнитного насыщения. Эти знания способствовали сокращению объема АД примерно до одной трети от первоначального объема в период с 1891 по 1901 год (рис. 4).

Впоследствии разработка ферромагнитных материалов была сосредоточена на снижении потерь в железе за счет термообработки маталла и оптимальное легирование кремнием для увеличения удельного сопротивления сплава, что позволило усилить магнитное поле и уменьшить объем АД для одной и той же мощности. Чтобы лучше понять причину уменьшения объема АД с течением времени, как показано на рисунке 4, относительно уменьшения, обеспечиваемого улучшением ферромагнитных материалов, можно смоделировать объем АД по увеличению напряженности магнитного поля. Это приложение все более интенсивных магнитных полей было одной из основных причин уменьшения объема электродвигателей с момента их разработки. Математическое выражение, которое переводит отношение объем/мощность в функцию приложенной плотности магнитного потока можно вывести из уравнения электромеханического преобразования энергии, где электродвижущая сила индуцирована фазой, формула впервые дана Cardoso:

$$E = 4{,}44 \times f \times N_{eff} \times \Phi \quad (1)$$

где: f – частота, *гц*, N_{eff} – количество витков в фазе, Φ – магнитный поток на полюс (*вебер*).

$$\Phi = 2 \times \frac{B \times L \times R}{p} \quad (2)$$

где: B – магнитная индукция в воздушном зазоре, *Тл.*, L – длина статора, в метрах, R – радиус воздушного зазора, в метрах, p – количество пар полюсов.

Электрический ток, выраженный как функция магнитного поля в воздушном зазоре двигателя, был расширен из классического уравнения магнитодвижущей силы и может быть выражен:

$$I = \frac{\pi \times p \times lg \times B}{3 \times \sqrt{2} \times \mu_0 \times N_{eff}} \quad (3)$$

где: π – число "пи", 3,14, p – пар полюсов, lg – длина воздушного зазора, в метрах, B – магнитная индукция в воздушном зазоре, *Тл*, μ_0 – магнитная проницаемость воздуха ($Н/м$), N_{eff} – количество витков в фазе. Без учета потерь любого типа мощность двигателя будет определяться как:

$$P = m \times E \times I$$

где m – количество фаз двигателя. Замена E и I их значениями выраженными в уравнениях (1) и (3), дает:

$$P = \frac{\pi \times m \times p^2 \times lg \times n}{3 \times \mu_0} \times B^2 \times Vol \quad (4)$$

где: n – синхронная скорость вращения оборотов в минуту, $Vol = \pi \times R^2 \times L$ – объем мотора. Преобразовав уравнение 4 можно математически проверить соотношение объем/мощность АД и другого устройства в котором используются ферромагнитные материалы, пропорционально напряженности внутреннего магнитного поля в уравнении 5.

$$\frac{Vol}{P} = \frac{1}{Km \times B^2} \quad (5)$$

где Km:

$$Km = \frac{\pi \times m \times p^2 \times lg \times n}{3 \times \mu_0} \quad (6)$$

Уравнение 5 обратно пропорционально квадрату плотности магнитного потока и представляет собой линию подобную кривой на рис. 4. Она представляет объяснение уменьшения объема или веса АД с годами более существенным увеличением магнитного поля на магнитную структуру АД, как показано на рисунке 9.

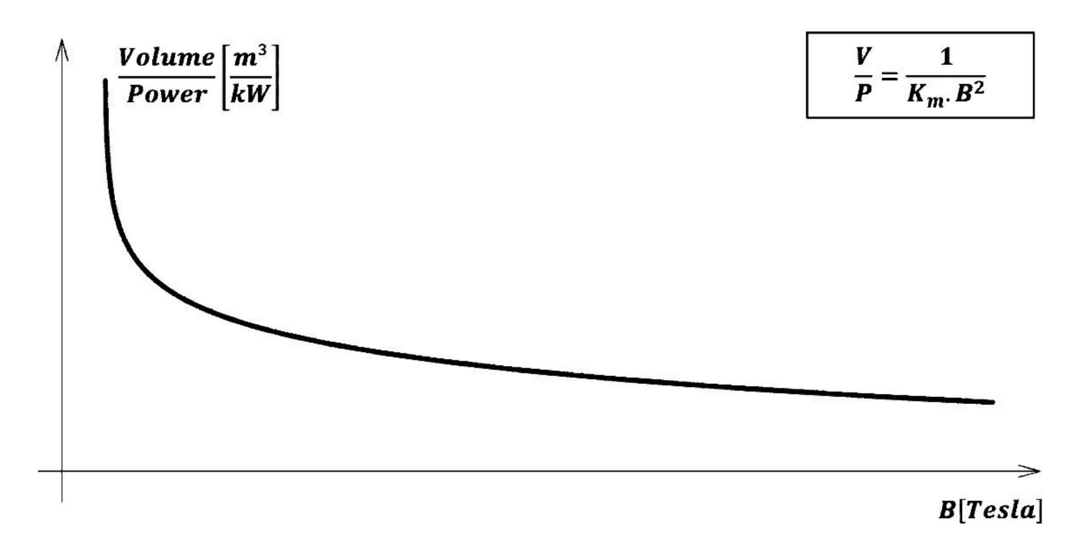


Рис. 9. Плотность магнитного потока в воздушном зазоре и объем АД.
(уменьшение объема двигателя с ростом магнитной нагрузки железа статора)

На рис. 9 представлена взаимосвязь между улучшением качества ферромагнитного материала и уменьшением объема АД при той же выходной мощности.

В результате уравнения 5 кривая является теоретической, поскольку невозможно спроектировать электрическую машину с неограниченной плотностью магнитного потока *B* или значением *B* близким к нулю. Следовательно кривая представляет собой одну из существенных причин сокращения объема АД от первых моделей до настоящего времени.

Подсчитано, что для электродвигателей мощностью 110 *квт* потери в ферромагнитных материалах составляют в среднем 60% от всей суммы потерь в электродвигателе. Потери увеличиваются с увеличением частоты электрического напряжения. Ферромагнитные материалы также претерпели усовершенствования от первых электродвигателей до нынешних.

С тех пор как Майкл Фарадей продемонстрировал электромагнитную индукцию в 1831 году, магнитомягкие (ферромагнитные) материалы продолжали развиваться. Когда железо было единственным доступным магнитомягким материалом, металлурги и материаловеды экспериментировали вводя элементы легирования для повышения магнитной эффективности стали.

Основными известными потерями в ферромагнитных материалах являются потери на гистерезис и вихревые токи. Гистерезисные потери возникают из-за коэрцитивной силы магнитного материала. Каждый раз, когда материал с магнитными характеристиками завершает полный цикл своей кривой намагничивания, площадь этой кривой соответствует потерям энергии в процессе намагничивания. Вторым основным механизмом потерь в магнитомягких материалах являются вихревые токи. Токи Фуко представляют собой замкнутые пути электрического тока генерируемые в проводнике источником которого является переменное магнитное поле. Эти токовые петли создают магнитное поле противодействующее изменению магнитного потока (согласно закону индукции Фарадея). Потери энергии вызванные вихревыми токами приблизительно пропорционально соответствуют квадрату рабочей частоты и таким образом являются значительной причиной потерь в машинах переменного тока.

Разработка кремнистой электротехнической стали примерно в 1900 году стала заметным событием в развитии магнитомягких материалов. Кремниевая сталь по-прежнему доминирует на мировом рынке электротехнических сталей и является предпочтительным материалом для трансформаторов и электромашин, такие как АД. В 1900 году Роберт Хэдфилд, металлург из Англии, и его команда разработали неориентированную кремнистую сталь, добавив к железу до 3% кремния увеличив ее электрическое сопротивление.

Группа под руководством американского металлурга Нормана Госса в 1933 году разработала текстурированную кремнистую сталь с ориентацией кристаллических зерен вдоль направления проката. Наиболее распространенными областями применения кремнистой стали являются трансформаторы (зернистая кремнистая сталь) и электрические машины (неориентированная изотропная кремнистая сталь предпочтительнее для вращающихся машин), для которых экономичная цена является большим преимуществом. Также были достигнуты улучшения магнитных свойств, от обработки железа для минимизации химических примесей до методов проката железа в тонкие листы. На рис. 10 представлено уменьшение потерь в сердечнике электрических машин в ваттах на каждый килограмм ферромагнитного материала с отметкой преобладающих технологических достижений каждого периода.

На рис. 10 можно увидеть, что в период с 1884 по 1970 г. потери в сердечнике электрооборудования переменного тока изменились с 8,16 *вт* на 1 *кг.* до 0,44 *вт*/*кг*, что составляет снижение примерно на 95%. На рис. 10 снижение потерь показано при низких частотах 50 или 60 *гц* и при постоянном значении *B* (*Тл*), так как оба эти обстоятельства напрямую влияют на потери в ферромагнитных материалах.

Сегодня основными мягкими ферромагнитными материалами в электродвигателях являются сплавы железа и ферросилиция (2022 г.).

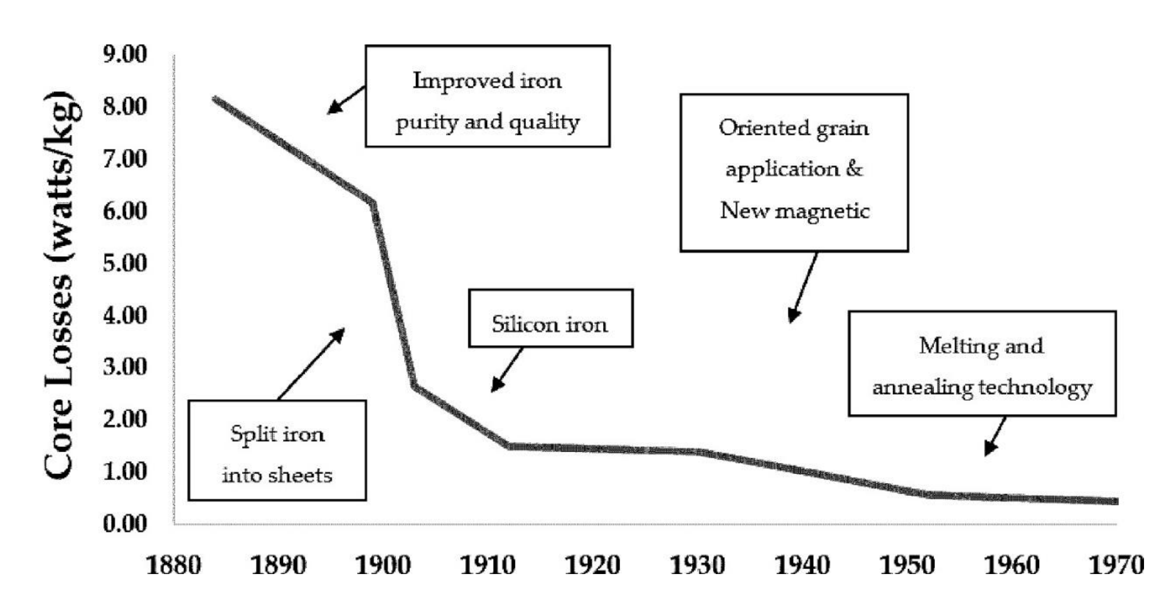


Рис. 10. Изменение потерь в сердечнике электрических машин,
ватт на килограмм электротехнической стали.

С 1970-х годов разрабатываются материалы с еще более меньшими потерями на вихревые токи и гистерезис. После энергетического кризиса 1970-х годов были первые попытки использования аморфных материалов для электродвигателей (1981 г.). Мишлер и др. продемонстрировали возможности аморфного материала статора с низкими потерями в лабораторных условиях. В 1967 г. был введен новый класс материалов – аморфные сплавы. В середине 1970-х годов возрос интерес к аморфным сплавам на основе железа и кобальта и эти материалы стали находить применение. Однако только в 1988 году исследователи Hitachi исследовали добавки Nb и Cu. Они добавили стадию отжига к аморфным сплавам для образования небольших кристаллитов железа или кобальта в аморфном материале. Образование изолированных кристаллитов переходных металлов снижает потери на вихревые токи по сравнению с традиционными аморфными сплавами. Несмотря на более высокую первоначальную стоимость, чем кремнистая сталь, эти усовершенствованные сплавы могут снизить общие затраты во время срока службы электродвигателей за счет снижения потерь.

В настоящее время (2022 г.) разрабатываются уникальные методы обработки, включающие термические манипуляции, лазерную бомбардировку и другие технологии для производства высокоэффективных магнитных материалов.

Изменения в производительности асинхронных двигателей (*кпд*).

Менялся не только вес и объем электродвигателей на протяжении лет их совершенствования. Последовательные изменения в производительности АД прослеживаемые от первых коммерчески доступных версий до сегодняшних версий для массового производства (2022 г.) произошли не только по причине технологических достижений, не только от уже упомянутых технологических инноваций, но и от улучшений в процессе производства и применение более качественных активных материалов. Свен Шёберг представил несколько причин повышения производительности АД производства компании ABB Motors после большого цикла улучшений, завершившегося в 1970-х годах. Эти причины следующие:

Повышение точности режущего инструмента и устранение заусенцев при обработке.

Контроль ламинирования статора перед прессованием, сварка, опрессовка набора статора. Более точная механическая обработка внешней поверхности сердечника статора (как правило, не требуется), уменьшение шероховатости поверхности и уменьшение допусков.

Уменьшение длины витков в обмотке статора, выбор более эффективного типа обмотки, увеличение коэффициента заполнения паза, применение более тонкой пазовой изоляции, более технологичные соединения в обмотке.
Улучшение результатов пропитки, заполнения и улучшение теплообмена.
Более тщательное заполнение пазов и замыкающих колец ротора при отливке клетки ротора, контроль чистоты литейного материала, балансировка ротора. Выбор более оптимальной стали вала, размера вала, более точная обработка вала ротора.
Свен Шёберг в 1997 г. представил изменения характеристик АД произведенных ABB Motors в период с 1935 по 1996 год, как показано на рисунке 11. По публикации Шёберга, изменения производительности не были результатом принципиальных изменений конструкции АД, а произошли из-за улучшения материалов, технологических приемов, и совершенствования производственных процессов.

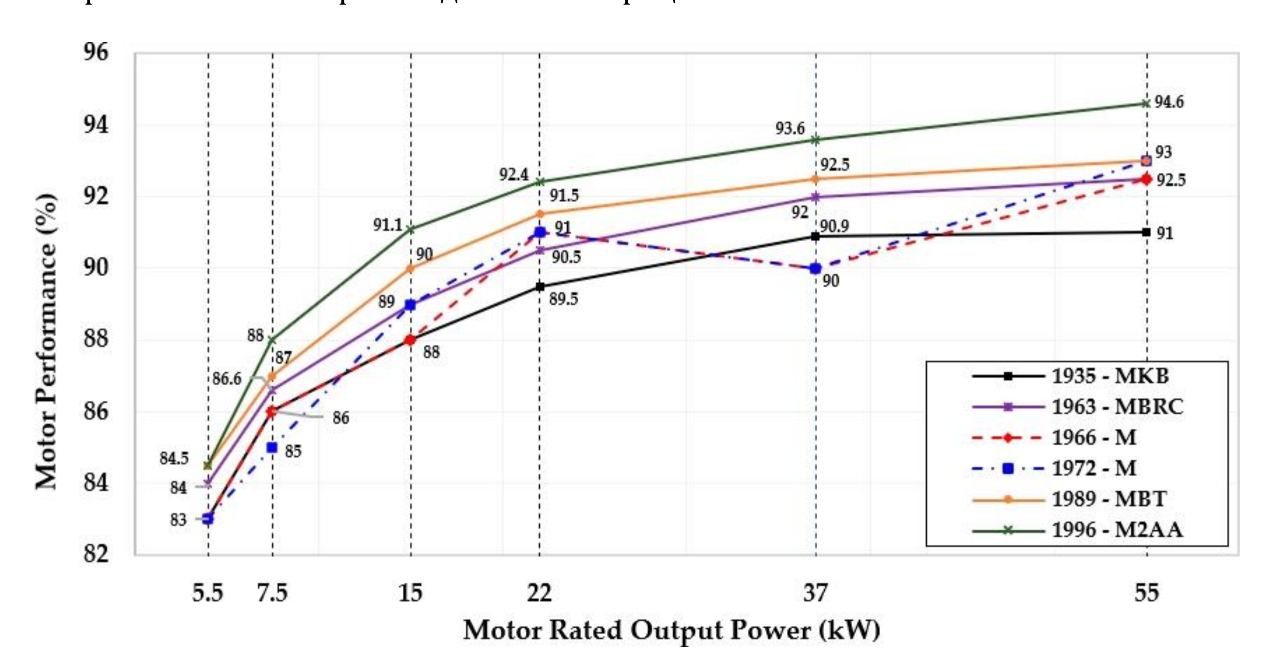


Рис. 11. Изменения в производительности (*кпд*) 4-полюсных асинхронных двигателей ABB Motors разных серий в период с 1935 по 1996 год.

На рисунке 11 видно, что в 1960-х и 1970-х годах произошло снижение средней производительности АД, учитывая широкий диапазон мощности. В некоторые периоды производительность была даже ниже, чем в целом по отрасли производства электродвигателей в 1935 году. Исследователь Свен Шёберг в своем тексте не определяет причин которые привели к этому временному падению производительности между 1970-ми и 1980-ми годами.
Для Министерства энергетики США 1960-е и 1970-е годы были периодами экономического кризиса, когда изготовители производили более дешевые АД по сравнению с предыдущими годами. Эти АД были менее эффективными, как показано на рис. 12, поскольку они свели к минимуму использование таких материалов, как медь, алюминий и сталь. По данным Министерства энергетики, эти АД имели более низкие первоначальные затраты, чем предыдущие проекты, потребляли больше электрической энергии из-за их меньшей эффективности, их использование на протяжении всего срока работы обходилось дороже. На рисунке 12 показано, что четырехполюсные АД произведенные и продаваемые в Северной Америке в 1980-х годах, имели еще более низкие характеристики, чем АД, произведенные в 1944 году, когда были впервые официально зарегистрированы стандарты эффективности Министерством энергетики.

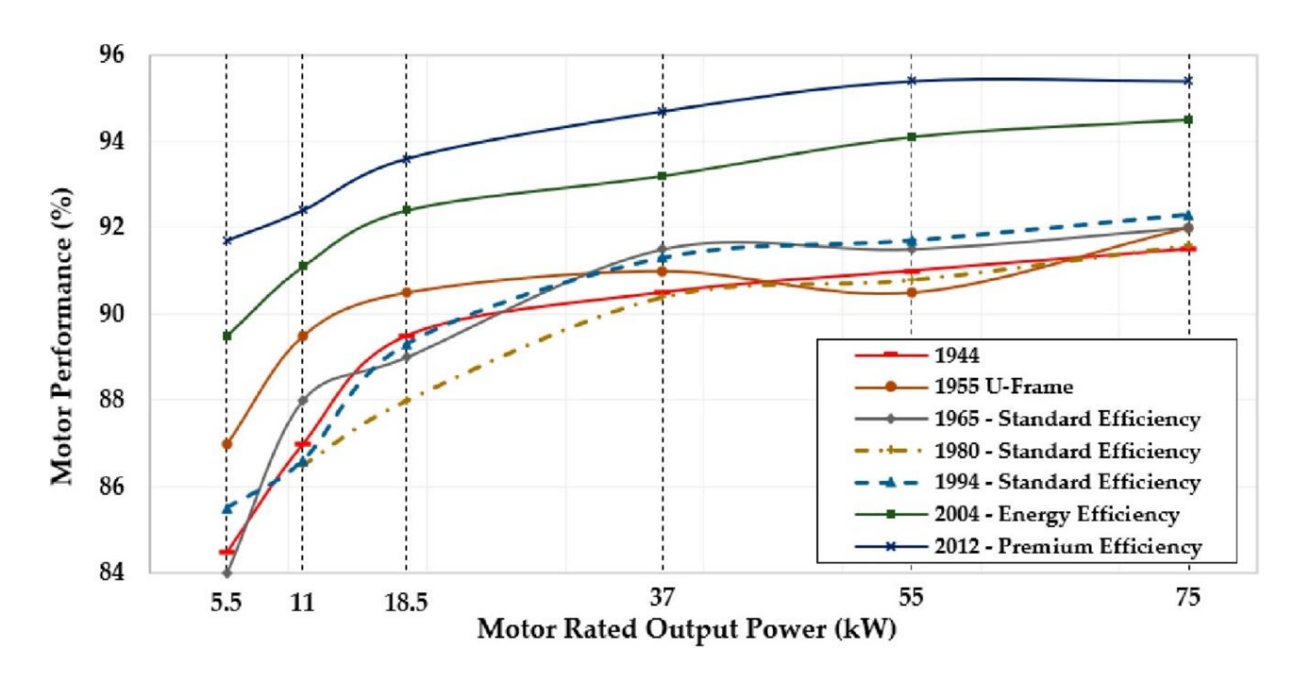


Рис. 12. Изменения производительности 4-полюсных АД производимых в Северной Америке в период с 1944 по 2012 г.

По данным Министерства энергетики более эффективные и более компактные АД стали возможны с изоляционными материалами способными выдерживать более высокие температуры. АД были спроектированы так чтобы допускать более высокие тепловые потери из-за повышения температуры в катушках расположенных в статоре, что позволяет размещать обмоточные провода в меньших по размеру статорах без повреждения изоляции.

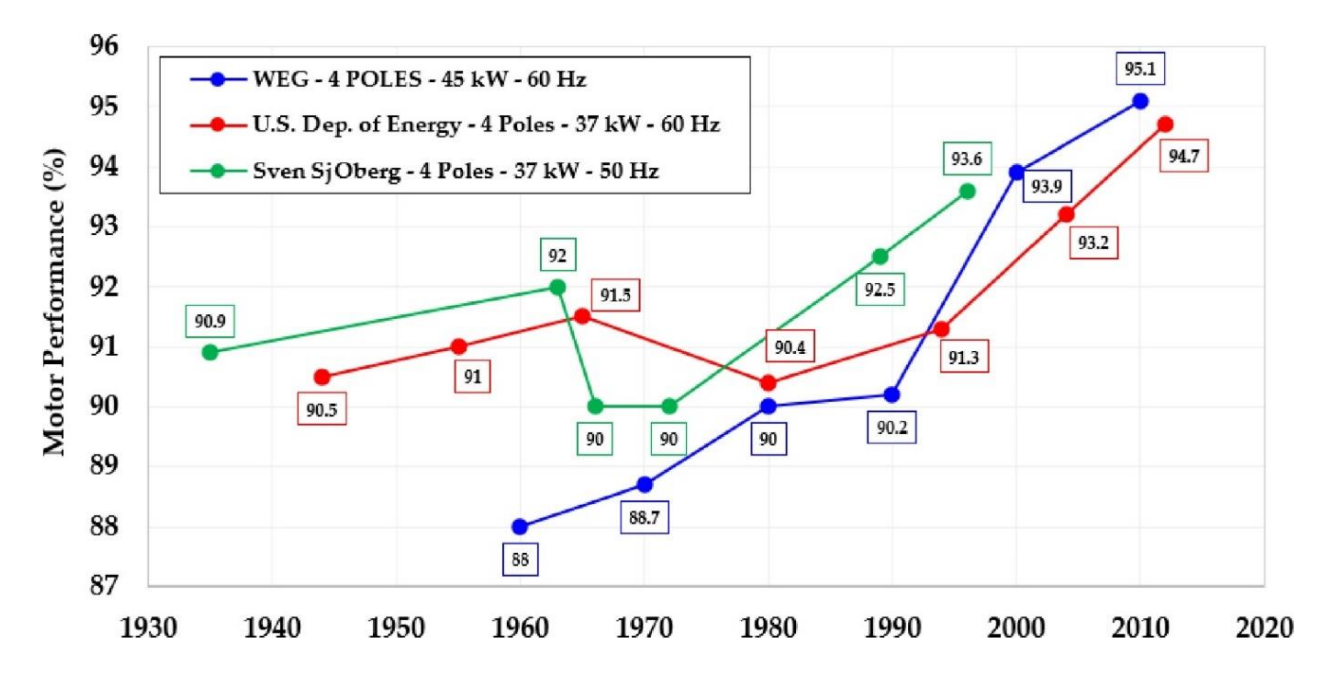


Рис. 13. Изменения производительности 4-полюсного АД в период с 1935 по 2012 год. В сравнении данных компании WEG, департамента энергетики США, ABB Motor.

На рис. 13 показаны изменения *кпд* четырехполюсных АД с двигателями номинальной выходной мощностью 37 и 45 *квт*, работающими на частоте 50 или 60 *гц* при низком напряжении. На рис. 13 показаны средние показатели, представленные ABB Motor, WEG и департаментом энергетики США. АД показали снижение производительности в период с 1960-х по 1980-е годы.

Рисунок 13 иллюстрирует данные о производительности доступные в публикациях компании WEG начиная с 1960 года, когда компания была создана. Показатели АД WEG ниже чем в целом на международном рынке и бо́льший рост *кпд* в 2010 году.

Изменения производительности асинхронных электродвигателей
в период с 1945 по 2020 год.

АД и большая часть электромеханического оборудования разработанного в 20-м веке, претерпели ряд улучшений и доработок, от изменения концепции до технологической достижений в процессах конструирования в основном в улучшении качества используемых материалов. Для анализа изменения *кпд* 359 АД со скоростями, соответствующими двум, четырем, шести и восьми полюсам, при номинальной выходной мощности двигателя 3,7, 37, 150 *квт*, представлены на следующих рисунках, На рис. 14 показаны колебания *кпд* двухполюсных АД на протяжении времени с 1945 по 2020 год.

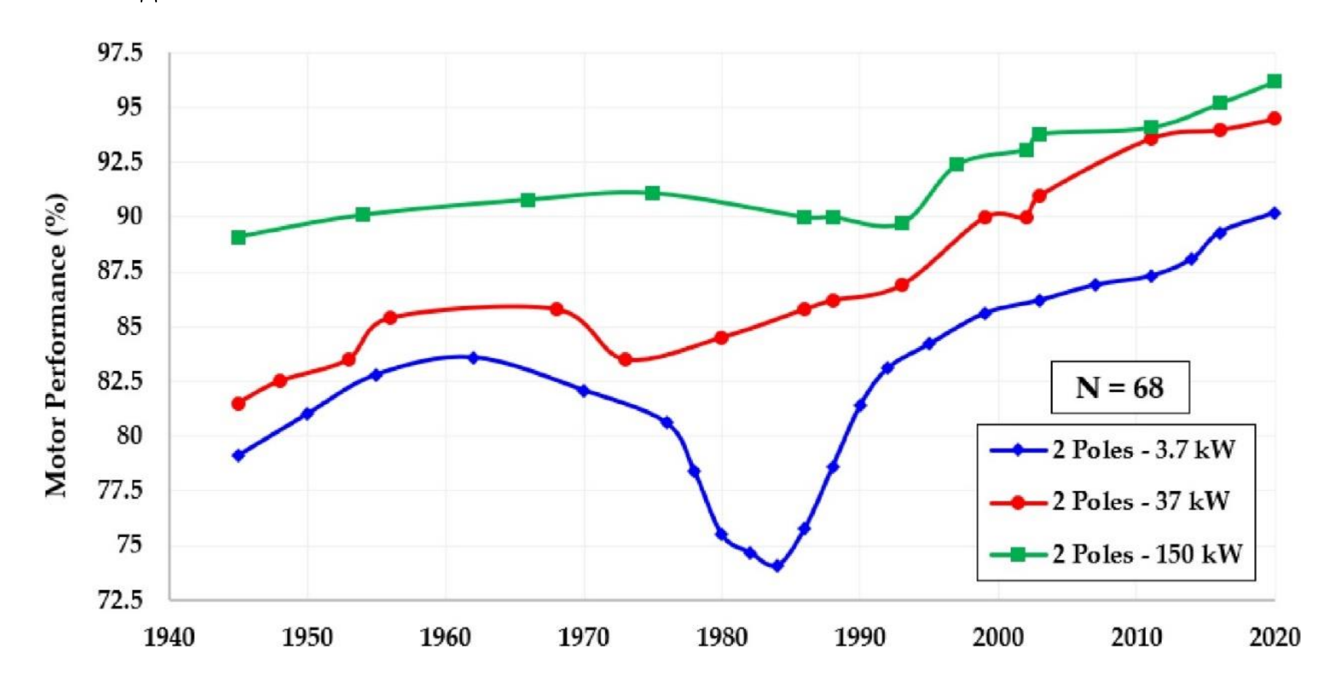


Рис. 14. Средний *кпд* двухполюсных АД в период с 1945 по 2020 год.

На рис. 14 показаны результаты испытаний 68 АД, организованных по трем мощностям и распределенных по времени. По тем годам для которых доступны данные построен график, по результатам более чем одного электродвигателя одинаковой скорости и механической мощности. Для тех лет для которых данные не доступны данные использовался метод линейной регрессии между соседними годами, за которые были доступны данные. Те же соображения были применены к рисунку 15 (четырехполюсные), рисунку 16 (шестиполюсные) и рисунку 17 (восьмиполюсные).

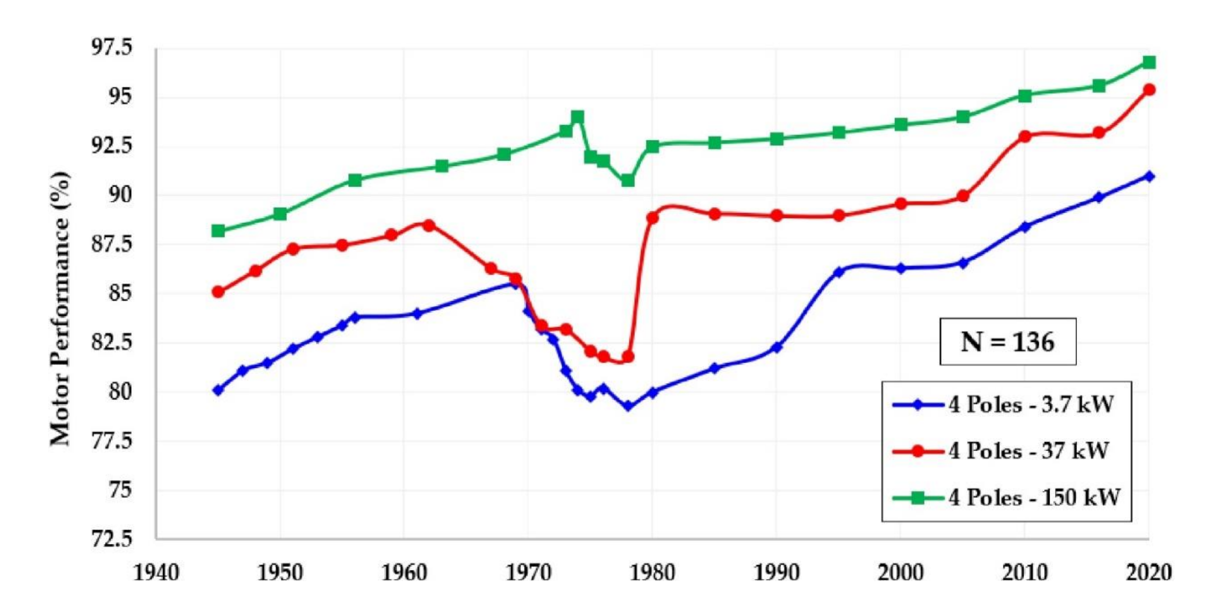


Рис. 15. Средний *кпд* четырехполюсных АД в период с 1945 по 2020 год.

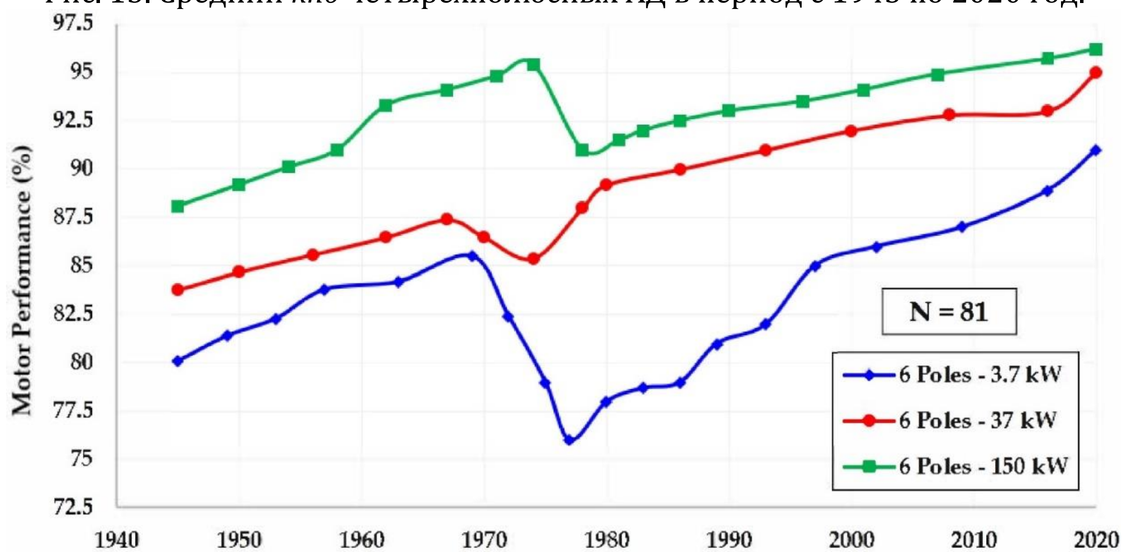


Рис. 16. Средний *кпд* шестиполюсных АД в период с 1945 по 2020 год.

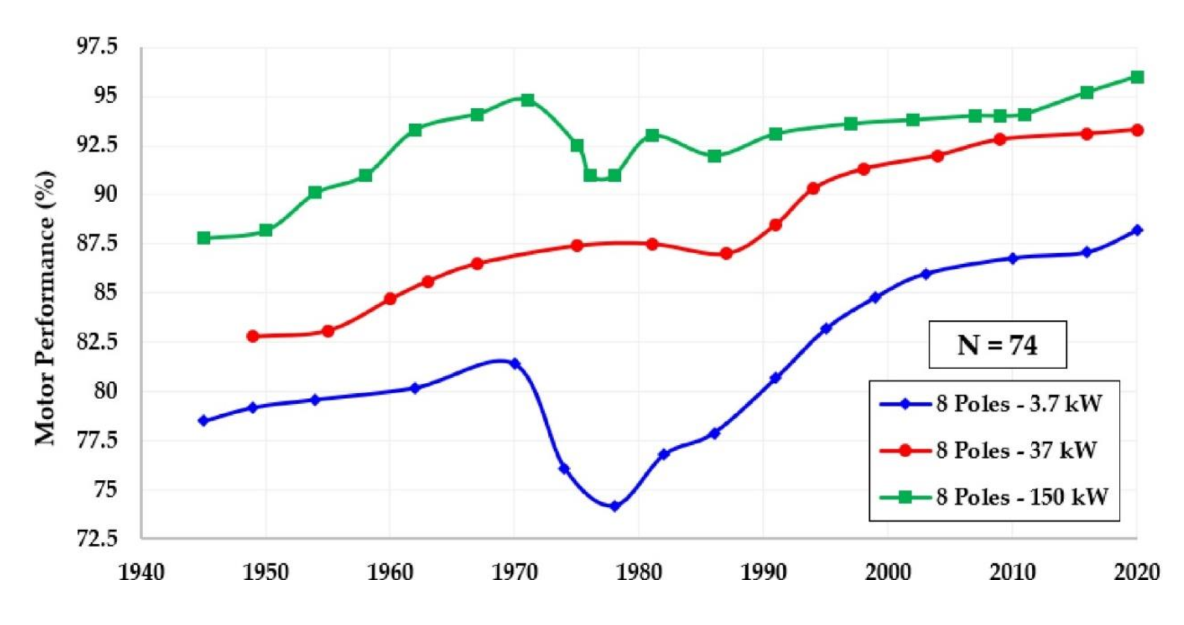


Рис. 17. Средний *кпд* восьмиполюсных АД в период с 1945 по 2020 год.

В таблице далее представлен совокупный прирост производительности с 1945 по 2020 год для трех значений мощности.

Средние значения *кпд* электродвигателя, изменения при выходной мощности, *квт*.

при мощности и количестве полюсов	при 2*p* = 2			при 2*p* = 4			при 2*p* = 6			при 2*p* = 8		
	3,7	37	150	3,7	37	150	3,7	37	150	3,7	37	150
кпд % в 1945 г.	79,1	81,5	89,1	80,1	85,1	88,2	80,1	83,8	88,1	78,5	82,8	87,8
кпд % в 2020 г.	90,2	94,5	96,2	91	95,4	96,8	91	95	96,2	88,2	94	96
увеличение кпд %	11,1	13	731	10,9	10,3	8,6	10,9	11,2	8,1	9,7	11,2	8,2
снижение потерь %	53,1	70,3	65,1	54,8	69,1	72,9	54,8	69,1	68,1	45,1	65,1	67,2

Как правило, мощные АД всегда ассоциируются с высокой производительностью. Они часто подвергаются более строгому контролю качества со стороны производителей и пользователей, которые обеспокоены потерями в этом оборудовании, потому что они в первую очередь преобладают в промышленной электрической нагрузке. Это объясняет тот факт, что АД более высокой мощности, например 150 *квт*, имеют меньший прирост производительности за указанный временной интервал.
АД средней мощности (37 *квт*) и малой мощности (3,7 *квт*) имеют более высокий прирост *кпд*, с накопленными значениями 13% и 11,1%, соответственно, исходя из анализируемого периода. Другими словами, снижение потерь в двухполюсных АД с 1945 по 2020 г. составило 53,1% для 3,7 *квт*, 70,3% для 37 *квт* и 65,1% для 150 *квт*.

Тенденции, показанные на рисунках и в таблицах аналогичны для разного количества полюсов.
1. Между 1945 и серединой 1960 годов АД демонстрировали постоянный рост производительности.
2. Между 1960 и 1980 годами АД показали значительное падение производительности, в некоторых случаях достигнув более низкого уровня, чем в 1945 году.
3. В период с 1980 по 2020 год снова преобладало улучшение производительности. Это привело к высоким уровням производительности в последние годы. Обобщая результат с 1945 по 2020 год, прирост средней производительности составил более 10%, и снижение потерь примерно на 45% по наиболее скромной оценке.

На эти тенденции, для каждого из трех описанных выше периодов, повлияло несколько обстоятельств. Сначала 1945 и по середину 1960-х годов проявлялся интенсивный процесс технологических инноваций, в котором выделяются следующие элементы непосредственно повлиявшие на повышение производительности асинхронных двигателей:
a. Многие АД в 1940-х годах, все еще имели подшипники скольжения. Подшипники скольжения, по сравнению с шарикоподшипниками больше и тяжелее имеют большее трение и меньший ресурс работы, требуют масляной смазки и ее постоянного обновления.
b. В 1940-х годах произошел переход от стальных и медных стержней корзины обмотки ротора к ротору с алюминиевыми стержнями. Алюминий имеет более низкое удельное электрическое сопротивление и меньшую плотность, он легче при той же мощности.
c. Достижения металлургии позволили строить корпуса АД более компактными, повышая безопасность эксплуатации, сохраняя вентиляцию обмоток, уменьшая вес и объем.
d. Изоляция в этот период претерпела существенные усовершенствования, перейдя от использования хлопка к шелку, что позволило значительно уменьшить размер паза, и также уменьшить размер и объем АД.
e. За счет использования шелковой изоляции удалось разместить в пазе больше меди, снизив наиболее значительные потери в АД – джоулевые потери в проводах обмотки статора.

f. В тот период были заметны улучшения в производственных процессах АД, благодаря достижениям качества режущих инструментов и лучшей обработке активных ферромагнитных материалов.
g. Между 1884 и 1970 годами потери в сердечнике АД снизились с 8,16 *вт/кг* до 0,44 *вт/кг*, что представляет собой уменьшение примерно на 95%.
Во второй период, между 1960 и 1980-ми годами, АД показали значительное падение производительности, но и в этот период была усовершенствована лаковая изоляция проводников. Лак позволил выдерживать более высокие температуры без ущерба для обмотки. По этой причине появились конструкции АД допускающие более значительные потери в проводах обмотки статора из-за повышения температуры в катушках. Температуры до 180°С, стандартизированные в 1970-х годах (нижеследующая таблица), уже применялись в некоторых АД.

буква обозначения	класс изоляции, температура класса в °С
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
-	250

Хлопок и шелк работали только как электрические изоляторы. Лак проводников напротив, является не только электрическим изолятором, но и проводником тепла. Этот фактор позволил разместить провода обмоток в еще более меньших пространствах без повреждения изоляции и улучшить охлаждение за счет повышенной передачи тепла, образующегося в основном в проводах обмотки статора, на внешнюю поверхность и за счет ребер на корпусе. Когда для изоляции провода обмотки используется лак он отводит образующееся тепло, возникающее из-за потерь в проводах обмотки статора на корпус (рис. 18). При этом ребра корпуса предназначены для увеличения площади контакта с воздухом, тем самым улучшая процесс отвода тепла от электродвигателя.

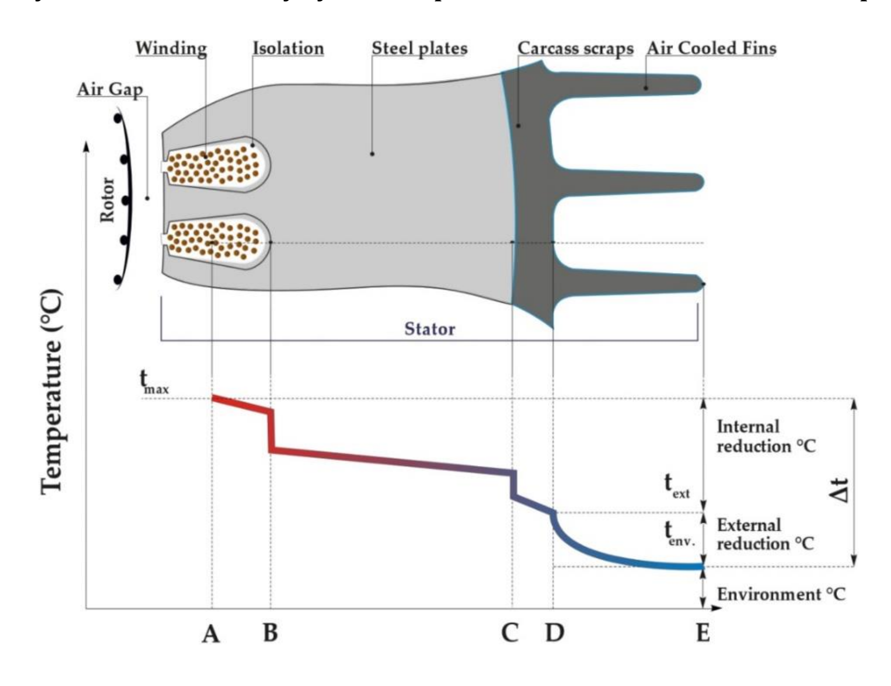


Рис. 18. Точки измерения температуры статора (A, B, C, D и E).

Снижение температуры в АД между точками A и E, на рисунке 18, можно описать следующим образом:
A – самая горячая точка АД в пазе, где выделяется тепло от джоулевых потерь в проводах обмотки статора.
AB – снижение температуры в результате передачи тепла от нагрева в пазе к железу статора. Поскольку воздух не является хорошим проводником тепла, внутри паза не должно быть пустот. Поэтому обмотки необходимо уплотнять и пропитывать максимально заполняя пустоты пропиточным лаком.
B – снижение температуры через пазовую изоляцию между проводами обмотки и металлом статора. Обычно для пазовой изоляции используют специальную бумагу или синтетические изоляционные пленки.
BC – снижение температуры за счет теплопередачи в массив металлического статора.
C – снижение температуры в месте контакта сердечника статора с корпусом. Точная обработка корпуса для уменьшения неровностей поверхности имеет важное значение для теплопроводности.
CD – снижение температуры за счет теплопередачи в оболочку корпуса.
DE – снижение температуры за счет внешнего оребрения АД.

Уменьшение количества меди позволило снизить стоимость АД, поскольку медь является наиболее затратной статьей при изготовлении электродвигателей. Эта тенденция была подтверждается в отчетах об испытаниях анализируемого периода. Увеличение джоулевых потерь ($I^2 \times R$) в проводах обмотки статора в основном наблюдались по отношению к предыдущим десятилетиям. При уменьшении сечения медных проводников уменьшается и общая масса АД. Снижение содержания меди увеличило джоулевы потери и повысило рабочую температуру.

В третий период, между 1980 и 2020 годами, об улучшении средней производительности АД свидетельствовали в основном следующие наблюдения. Политика минимального уровня производительности применялась в крупнейших экономиках мира в период с 1990-х по 2020 год. Политика, указывающая минимальные энергетические характеристики оборудования, называется "стандартами энергетической эффективности" которые определяют минимальные уровни энергоэффективности. Основная цель стандартов направлять характеристики оборудования производимого для потребителя и устанавливать минимальные требования.
Стандарты устанавливают обычно государственные органы. В случае АД, в стандартах указаны классы производительности допускающие различные уровни, которые показывают требования к определенному минимальному значению в соответствии с технологическими достижениями и признанием на рынке. Классы производительности для АД на международном уровне обозначены кодом IE в документе IEC 60034-30-1, который широко принят в качестве стандарта и является основой для различных региональных документов по энергетической политике. Стандарт определяет классы эффективности от IE1 до IE4 (рис. 19), где IE1 – самый низкий, а IE4 – самый высокий. Точно так же в Соединенных Штатах классы производительности от IE1 до IE4 называются стандартной эффективностью, высокой эффективностью, эффективностью премиум-класса и эффективностью супер-премиум, согласно NEMA. Новый класс IE5 подробно не описан, однако определение ожидается в будущей редакции стандарта, IE5 предполагает уменьшение потерь примерно на 20% по сравнению с классом IE4.
Двигатели протестированные в 2020 году, уже были класса эффективности IE3. Таким образом в ближайшие несколько лет можно ожидать еще один шаг в повышении производительности АД. Внедрение стандарта имело место в США и Канаде в 1997 году, а затем постепенно применялось в других странах с поправками внесенными каждым энергетическим агентством разных стран, как показано на рисунке 20.

Чтобы соответствовать новому законодательству, которое устанавливает более высокие показатели производительности, необходимым изменением стало снижение джоулевых потерь и обмотка статора стала изготавливаться из большего количества меди. Это изменение означает возврат к соотношению вес/мощность к уровню 1960-х годов.

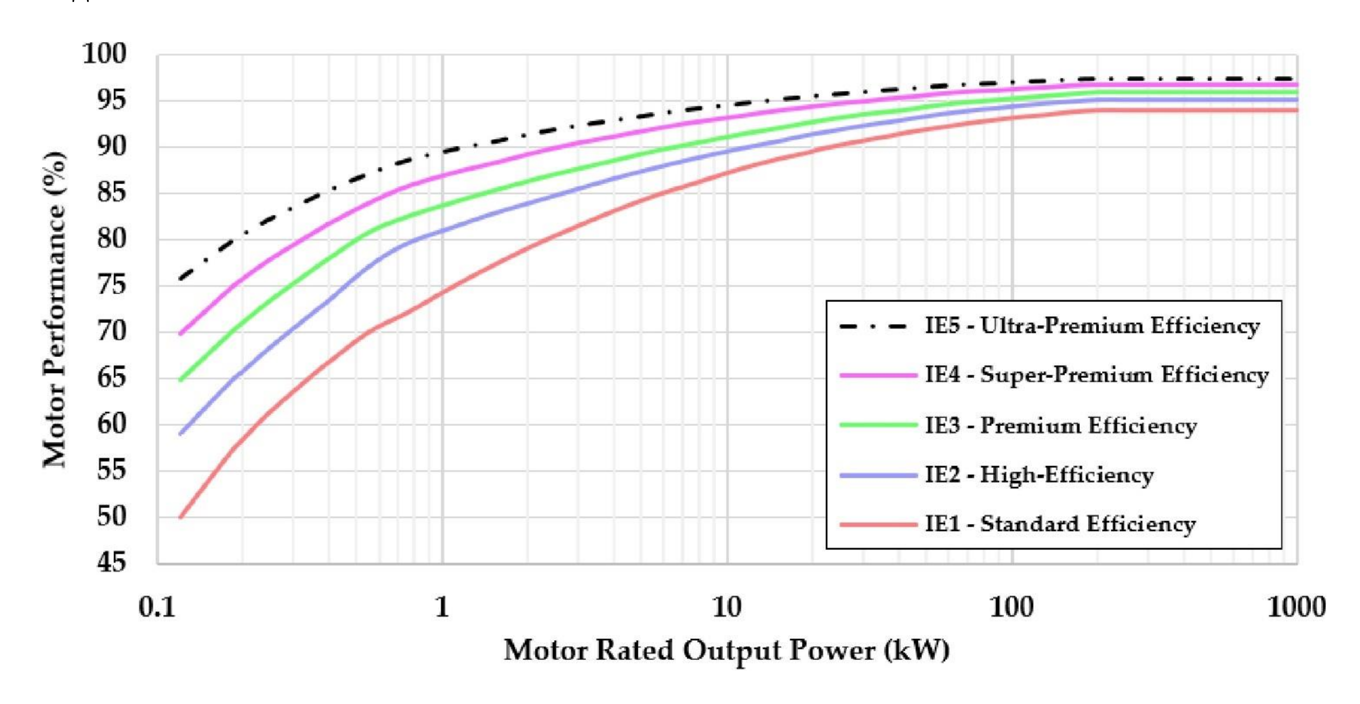


Рис. 19. Уровни эффективности (*кпд*) в классификации IEC 60034-30-1 (2014 г.) для 50 *гц*, 4-полюсного асинхронного электродвигателя.

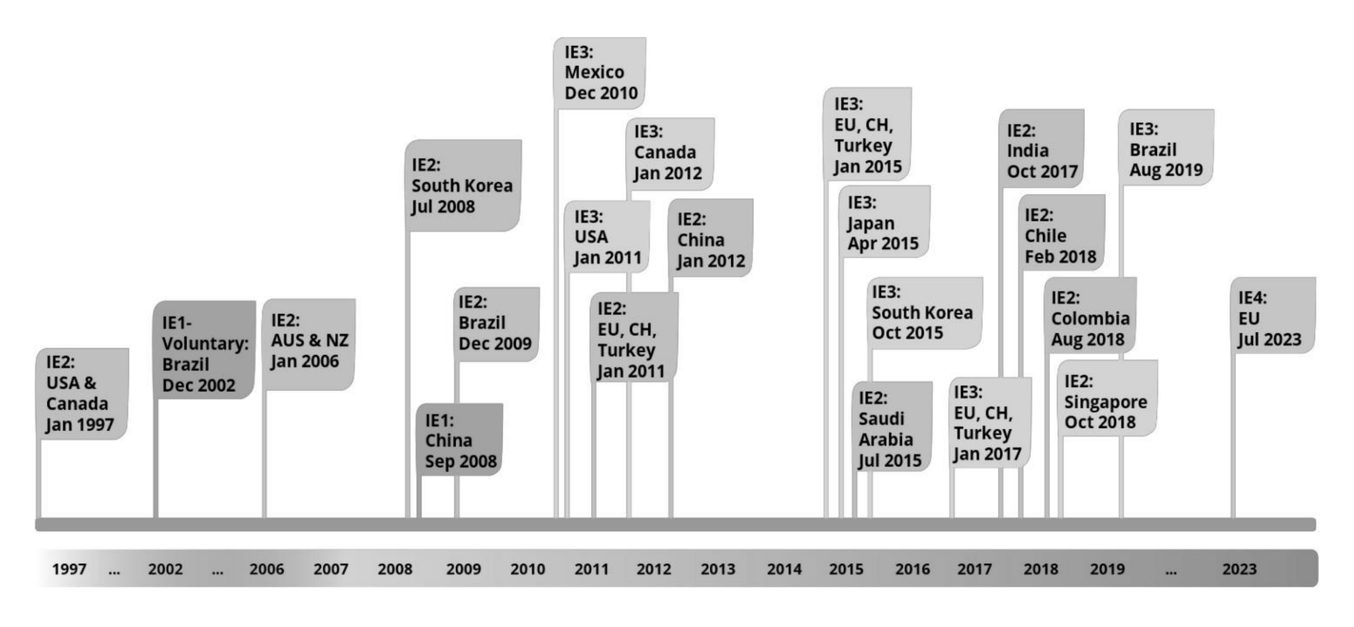


Рис. 20. Хронология принятия, по странам, стандартов производительности IE для АД.

В этот период наблюдались и другие второстепенные новшества, которые также повлияли на улучшение характеристик АД.

1. Усовершенствования в конструкции за счет использования программного обеспечения для моделирования позволяющего улучшить конструкцию и снизить вибрации и шум.
2. Трехмерное компьютерное моделирование электромагнитных полей, позволяющее оптимизировать проект.
3. Успехи в процессах изготовления сталекремниевых листов.
4. Использование более эффективного охлаждения.

Описанные три периода привели к глубоким изменениям соотношения вес/мощность. Анализ, представленный на рис. 4, демонстрирует снижение отношения веса к мощности и указывает на замедление в последующие годы, которые необходимо обновить. На рис. 21 показана более современное, обновленное состояние соотношений вес/мощность, чем на рис. 4, подтверждающее рост 10,2 *кг*/*квт* для той же мощности и скорости последние два десятилетия и возвращение к уровням 1950-х годов.

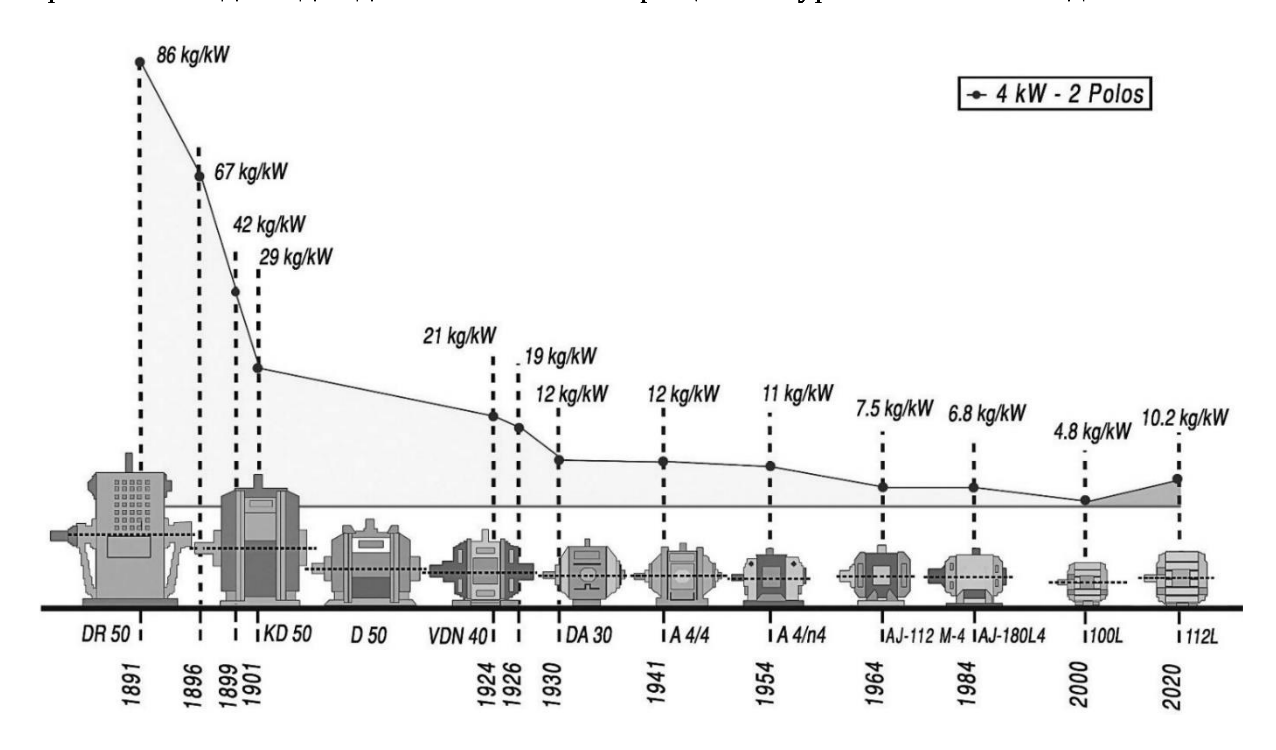


Рис. 21. Изменение отношения вес/мощность асинхронного электродвигателя
4 *квт*, 2 полюса в период с 1891 по 2020 г.



Рис. 22. Разница в количестве материалов конструкции
в стандартном (слева) и высокоэффективном (справа) АД.

Увеличение веса происходит, в основном, за счет использования проводников большего сечения для уменьшения потерь в той части конструкции, где они наиболее значительны, т. е. потери от эффекта Джоуля в проводах обмоток статора. Уменьшение объема электрической машины также может привести к проблемам с охлаждением.

В случае сильного нагрева происходит ухудшение свойств большинства материалов (изоляция и ферромагнитный материал), что приводит к сокращению срока службы АД. Это одна из причин, оправдывающих средний рост объема корпуса за последние два десятилетия. Также был удлинен пакет ротора и следовательно обмоток статора, что значительно увеличило количество материала, используемого в конструкции высокоэффективного двигателя, как показано на рисунке 22.
На рисунке 22 наиболее значительным изменением, при повышении производительности электродвигателя мощностью 5 л. с. (3,7 *квт*) с 84% до 90,2%, стало увеличение массы на 27 *кг* или примерно на 33% при сохранении размера корпуса. Для повышения производительности, превосходящие показатели показанные на рис. 22, необходимо было увеличить корпус, чтобы приспособить его к новым размерам статора и ротора. На рис. 21 показано, что за последние двадцать лет корпус АД объемом 100 л. увеличился до 112 л. Соотношение масса/мощность зависит от мощности и скорости, поэтому данные на рисунке 21 нельзя напрямую рассматривать к другим значениям мощности, однако форма кривой демонстрирует аналогичную тенденцию для других рядов мощности и скоростей. Постоянный рост соотношения вес/мощность не предполагается в будущем, поскольку в последние годы оно было оптимизировано за счет технологий.
Синхронные электродвигатели не имеют потерь в роторе, и это одна из основных причин по которой данный тип позволяет повысить уровень производительности. Синхронные двигатели также имеют меньший физический объем, чем традиционные АД. Если увеличение стоимости не станет препятствием, синхронные двигатели также могут быть жизнеспособными в системах с фиксированной скоростью. Для достижения IE5 в настоящее время рассматриваются две возможности. Одним из них является использование аморфных материалов с высокой магнитной проницаемостью для снижения потерь в сердечнике. Другим является использование меди в роторе, для уменьшения потерь, традиционно изготовляемого с использованием алюминия.
Магнитный пакет АД может быть изготовлен из аморфных сплавов, как продемонстрировала Hitachi с прототипом двигателя мощностью 11 *квт*, который достиг эффективности IE5. Прототип Hitachi имел меньший размер по сравнению с традиционным АД и производительность выше 93% в широком диапазоне нагрузок. Традиционные АД средней и малой мощности имеют ротор, изготовленный в основном, с использованием литого алюминия. Однако в 2002 г. удалось найти для некоторых применений АД с роторами с медью. Медный короткозамкнутый ротор позволяет снизить общие потери двигателя на 15–18%, это может означать повышение эффективности на 2–4% в зависимости от мощности и количества полюсов. Ротор с медью изготовлен из пластин электротехнической стали в котором стержни ротора и торцевые кольца изготовлены из литой меди, а не из литого алюминия. Медь является превосходным материалом для роторов, поскольку имеет более высокую электропроводность, чем алюминий. Использование медного ротора также может способствовать уменьшения размеров и общего веса двигателя, поскольку снижение потерь в роторе позволяет уменьшить общую длину ротора и соответственно статора.

Заключение.

В технической литературе часто можно прочитать, что "Асинхронный двигатель почти не изменился за последние 100 лет". Однако современные АД существенно отличаются от разработанных коллективом Михаила Доливо-Добровольского в период с 1888 по 1890 г. Утверждение действительно только при указании на принцип работы АД. Эта публикация показала значительные изменения в конструкции, материалах и компонентах, входящих в состав АД.
В настоящей публикации проанализирована производительность АД по результатам испытаний проведенных в Лаборатории электрических машин IEE/USP в период с 1945

по 2020 г. Использовались АД мощностью 3,7 *квт*, 37 *квт* и 150 *квт*. всего 359 электродвигателей. Что касается уровней производительности, результаты показали, что на исторической временной шкале можно было выделить три различных периода.

Между 1945 и серединой 1960-х годов АД практически постоянно увеличивали производительность. Это было связано с различными технологическими новшествами того периода, в основном с использованием ориентированных зерен в ферромагнитном материале, использованием алюминия в роторе, существенными улучшениями в конструкции и вентиляции. Между 1960 и 1980-ми годами, которые были периодом дешевой энергии, производители строили дешевые и относительно не эффективные АД, сведя к минимуму использование таких материалов, как медь, алюминий и сталь. Производство АД с меньшим объемом стало возможным благодаря разработке изоляционных материалов. в частности лаков способных выдерживать высокие температуры. Это позволило проектировать АД с более высокими потерями, особенно джоулевыми потерями в обмотке статора, так как повышение температуры за счет потерь могло передаваться на корпус без повреждения изоляции и сокращения ожидаемого срока службы двигателя (рис. 18). В этот период снижение производительности было настолько значительным, что в некоторых случаях производительность достигла более низкого уровня, чем у двигателей, выпущенных в 1945 году. Хотя эти двигатели имели более низкие начальные затраты, чем предыдущие конструкции, они использовали больше энергии из-за их не эффективности.

С 1980-х по 2020 год снова доминировало улучшение производительности. Центральным аспектом этого изменения производительности были технологии и материалы использованные для создания машин. Можно было заметить, что выигрыши были значительнее для небольших мощностей из-за большого запаса для улучшения материалов и проектов из-за низкой технической строгости конструкции. Снижение потерь в анализируемых АД за период 1945–2020 г. составило во всех случаях более 40% для трех анализируемых значений выходной мощности (3,7, 37 и 150 *квт*) и четырех возможных скоростей (двух, четырех, шести, и восемь полюсов). В случае АД мощностью 150 *квт* со скоростью соответствующей четырем полюсам, снижение потерь за этот период достигло 72,9%, показав значительный прогресс. Электродвигатели мощностью 37 *квт* со скоростью, соответствующей 2 полюсам, имели самый высокий накопленный прирост эффективности за анализируемый период. Их средняя эффективность выросла с 81,5% в 1945 году до 94,5% спустя 75 лет (2020 год), что привело к абсолютному приросту производительности на 13%. Зависимость между массой и мощностью в проведенном анализе представлена двумя периодами. Первым периодом было снижение на 94% между 1891 и 1984 годами, с 86 *кг/квт* до 4,8 *кг/квт*, благодаря различным технологиям, показанными в этой публикации. Второй период с 2000 по 2020 год показал в среднем увеличение на 112,5%, с 4,8 *кг/квт* до 10,2 *кг/квт*, в связи с необходимостью повышения производительности.

авторы: Danilo Ferreira de Souza [1, 2]
Francisco Antônio Marino Salotti [2]
Ildo Luís Sauer [2]
Hédio Tatizawa [2]
Arnaldo Gakiya Kanashiro [2]
Aníbal Traça de Almeida [3]

1. Факультет архитектуры, инженерии и технологий - FAET, кампус Куяба, Федеральный университет Мату-Гросу, UFMT, Куяба 78060-900, Бразилия.
2. Институт энергетики и окружающей среды IEE, Университет Сан-Паулу, USP, Сан-Паулу 05508-010, Бразилия.
3. Кафедра электротехники и вычислительной техники, Институт систем и робототехники, Университет Коимбры, 3030-290 Коимбра, Португалия.

Сокращенная адаптация на русский язык специально для forum.dvigatel.org

Оригинал публикации https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2002

18 July 2022